

# Forest ecosystem services in the tropics: an imperfect assessment of their contribution to welfare, and environmental policy implications

## Servicios de los ecosistemas forestales en los trópicos: una evaluación imperfecta de su contribución al bienestar e implicaciones en la política ambiental

Martín A. López-Ramírez

Universidad de las Américas Puebla. Exhacienda Santa Catarina Mártir. C. P. 72810.

Cholula, Puebla, México. e-mail: martin.lopez@udlap.mx; tel.: +55 222 229 2064.

### Abstract

**Introduction:** The specific relation between ecosystem services (ES), land use systems productivity and welfare is complex and poorly understood.

**Objective:** To analyze the relationship between natural capital and welfare in the Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) sector to assess Ecosystem Services contribution to agriculture, forestry and fishing value added (GDP [Gross Domestic Product]) and analyze policy implications.

**Materials and methods:** Using land use allocation variables, forest transition model and land use GDP for 97 tropical countries, the production function of AFOLU sector was estimated using a linear regression model and a bootstrap method. The properties of the function were analyzed, and the optimal land allocation was calculated.

**Results and discussion:** There is a direct contribution and an indirect contribution from forest ecosystems to GDP. The direct effect is manifested through the partial elasticity of forestland ( $P < 0.05$ ). The indirect effect is reflected through the production scale ( $P < 0.05$ ). Partial elasticity of agriculture is significantly higher than partial elasticity of forestland ( $P < 0.05$ ) and production scale increases as forestland is depleted ( $P < 0.05$ ). In addition, optimal land use indicates that 75 countries have forest surplus (13.2 Mkm<sup>2</sup>) and 22 forest deficit (1.5 Mkm<sup>2</sup>).

**Conclusions:** Forest ecosystems in the AFOLU sector in the tropics produce ecosystem services for society. However, these contributions are dwarfed by agricultural land productivity.

**Keywords:** Climate-smart agriculture; natural capital; land use; forest Transition; bootstrap method.

### Resumen

**Introducción:** La relación específica entre servicios ecosistémicos (SE), productividad de los sistemas de uso del suelo y bienestar es compleja y poco conocida.

**Objetivo:** Analizar la relación entre el capital natural y el bienestar en el sector de la Agricultura, Silvicultura y Otros Uso del Suelo (AFOLU), con el fin de evaluar la contribución de los SE al valor agregado (PIB [producto interno bruto]) de la agricultura, silvicultura y pesca, y sus implicaciones políticas.

**Materiales y métodos:** A través de variables de asignación de uso de suelo, el modelo de transición forestal y el PIB de uso de la tierra de 97 países tropicales, la función de producción del sector AFOLU se estimó mediante un modelo de regresión lineal y un método *bootstrap*. Las propiedades de la función se analizaron y se calculó la asignación óptima de la tierra.

**Resultados y discusión:** Existe una contribución directa e indirecta de los ecosistemas forestales al PIB. El efecto directo se manifiesta a través de la elasticidad parcial de las tierras forestales ( $P < 0.05$ ), y el indirecto, a través de la escala de producción ( $P < 0.05$ ). La elasticidad parcial de la agricultura es significativamente mayor que la de las tierras forestales ( $P < 0.05$ ) y la escala de producción aumenta a medida que las tierras forestales se agotan ( $P < 0.05$ ). El uso óptimo de la tierra indica que 75 países tienen superávit forestal (13.2 Mkm<sup>2</sup>) y 22 tienen déficit forestal (1.5 Mkm<sup>2</sup>).

**Conclusiones:** Los ecosistemas forestales en el sector AFOLU en los trópicos producen servicios ecosistémicos para la sociedad; sin embargo, estas contribuciones se ven opacadas por la productividad de la tierra agrícola.

**Palabras clave:** Agricultura climáticamente inteligente; capital natural; uso de suelo; transición forestal; método bootstrap.

## Introduction

The Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) sector is considered strategic to achieve sustainable development goals. For instance, the sector plays a fundamental role to address climate change because it contributes to mitigation and adaptation goals (Di Gregorio et al., 2017; Harvey et al., 2014). Additionally, it is essential to ensure food security for a growing population (Godfray et al., 2010; Mbow & Rosenzweig, 2019). The complex situation that AFOLU sector currently faces implies a substantial transformation of the current production paradigm. In order to address this multidimensional problem, Climate-smart Agriculture (CSA) has been proposed as an integral approach to reconfigure land use production systems (Food and Agriculture Organization [FAO], 2017). Among other elements, CSA relies on ecosystem and landscape management to preserve ecosystem services important for food security and to address climate change (FAO, 2017).

Ecosystem services (ES) are the direct and indirect benefits that human beings obtain from functioning ecosystems (Costanza et al., 2017). What differentiates ES from a biological or ecological process is that the latter are considered ES only when they contribute to human welfare (Costanza et al., 2017). The provision of ES relies on natural capital, which are the ecosystems where the biological and ecological processes previously mentioned take place (Costanza et al., 2017). It follows that natural capital depletion –for instance, in the form of deforestation– affects the provision of ES. However, the specific relation between ES, land use systems productivity and welfare is complex and poorly understood (Daw et al., 2016; Reed et al., 2017).

ES are classified in provisioning (e.g. agricultural products and timber), regulating (e.g. carbon capture and water flow regulation), supporting (e.g. nutrient cycling) or cultural (e.g. recreational and aesthetic values) (Locatelli, Lavorel, Sloan, Tappeiner, & Geneletti, 2017; Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Sharma et al., 2019). In this research, the role of provisioning and regulating services is further analyzed because the AFOLU sector has the characteristic that provisioning ES are rival from land allocation point of view, however, regulating ES may be complementary. For instance, if everything else remains constant, agricultural output increases by expanding the agriculture frontier, which is usually done at the expense of forests (HLPE, 2017; Hosonuma et al., 2012). However, empirical evidence shows that croplands benefit in multiple ways from nearby forests without sacrificing yields (Reed et al., 2017).

The previously described situation gave rise to the concept of synergies in the AFOLU sector, which

## Introducción

El sector de la Agricultura, Silvicultura y Otros Uso del Suelo (AFOLU) se considera estratégico para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible. Por ejemplo, el sector desempeña un papel fundamental para abordar el cambio climático porque contribuye a los objetivos de mitigación y adaptación (Di Gregorio et al., 2017; Harvey et al., 2014); además, es esencial para garantizar la seguridad alimentaria de una población en crecimiento (Godfray et al., 2010; Mbow & Rosenzweig, 2019). El sector AFOLU se enfrenta actualmente a una situación compleja, lo cual implica una transformación sustancial del paradigma de producción actual. Para abordar este problema multidimensional, se ha propuesto la agricultura climáticamente inteligente (ACI) como un enfoque integral para la reconfiguración de los sistemas de producción de uso de la tierra (Food and Agriculture Organization [FAO], 2017). Entre otros elementos, la ACI se basa en la gestión de los ecosistemas y el paisaje para la preservación de los servicios ecosistémicos importantes para la seguridad alimentaria y para abordar el cambio climático (FAO, 2017).

Los servicios ecosistémicos (SE) son los beneficios directos e indirectos que los seres humanos obtienen de los ecosistemas en funcionamiento (Costanza et al., 2017). Los SE se diferencian de un proceso biológico o ecológico; estos últimos se consideran SE solo cuando contribuyen al bienestar humano (Costanza et al., 2017). La provisión de SE depende del capital natural, que son los ecosistemas donde tienen lugar los procesos biológicos y ecológicos (Costanza et al., 2017). De ello se deduce que el agotamiento del capital natural –por ejemplo, en forma de deforestación– afecta a la provisión de SE; sin embargo, la relación específica entre SE, productividad de los sistemas de uso del suelo y bienestar es compleja y poco conocida (Daw et al., 2016; Reed et al., 2017).

Los SE se clasifican en aprovisionamiento (v. g. productos agrícolas y madera), regulación (v. g. captura de carbono y regulación del flujo de agua), soporte (v. g. ciclo de nutrientes) o cultural (v. g. valores recreativos y estéticos) (Locatelli, Lavorel, Sloan, Tappeiner, & Geneletti, 2017; Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Sharma et al., 2019). En esta investigación, se analiza más a fondo el papel de la provisión y regulación de servicios, debido a que el sector AFOLU tiene la característica particular de que la provisión de SE es rival desde el punto de vista de la asignación de tierras; sin embargo, la regulación de SE puede ser complementaria. Por ejemplo, si todo lo demás permanece constante, la producción agrícola aumenta al expandir la frontera agrícola, lo que generalmente se hace a expensas de los bosques (HLPE, 2017; Hosonuma et al., 2012). No obstante, la evidencia empírica muestra que las tierras de cultivo se benefician, de múltiples

highlights that simultaneous social and environmental gains are possible if landscapes are properly managed (Di Gregorio et al., 2017; Duguma, Minang, & van Noordwijk, 2014). In fact, it has been showed that when natural capital explicitly enters into the production function, optimal land allocation solution compile with the definition of synergy (Lopez, 2016, 2019). However, the previous result assumes the presence and contribution of ES in the AFOLU sector and this relationship lacks empirical support. In other words, it is not fully clear whether the ecological process that take place in forest ecosystems have a positive impact in land use productivity and welfare.

To address the mentioned knowledge gap, the relationship between natural capital and welfare in the land use sector was analyzed. The main goal was to identify the presence of ES, assess their contribution to welfare and derive policy implications by estimating a production function (under the null hypothesis that relevant coefficients are zero), analyzing its properties and calculating optimal land allocation. The state of natural capital was approximated through land allocation data and the forest transition model. Likewise, welfare was approximated through land use GDP (Gross Domestic Product). One hundred countries –not included in the annex I of the UNFCCC (United Nations Framework Convention for Climate Change)– were included in the analysis.

## Materials and Methods

### Data Sources and Pre-processing

The list of countries considered in this study (Appendix 1), continental location and their classification within forest transition process was obtained from Hosonuma et al. (2012). Forest transition is the process of deforestation and later reforestation that a country experiences because of economic development (Barbier, Burgess, & Grainger, 2010; Hosonuma et al., 2012). In the mentioned research work, the authors classified 100 tropical and subtropical (non-annex I of the UNFCCC) countries into one of the four phases of forest transition process (pre-transition, early transition, late transition and post-transition), based on land use dynamics observed in the 1990-2010 period. The pre-transition phase is characterized by a high forest cover and low (e.g., close to zero) deforestation rate. During the early transition deforestation rate increases and, as consequence, forest cover declines. In the late transition, deforestation rate decelerates, and forest cover is low. Finally, the late transition is characterized by a reforestation process (Hosonuma et al., 2012).

The welfare indicator (agriculture, forestry and fishing value added) –hereafter called land use GDP– and the

maneras, de los bosques cercanos sin sacrificar sus rendimientos (Reed et al., 2017).

La situación ya descrita dio lugar al concepto de sinergias en el sector AFOLU, el cual destaca que los beneficios sociales y ambientales simultáneos son posibles si los paisajes se gestionan adecuadamente (Di Gregorio et al., 2017; Duguma, Minang, & van Noordwijk, 2014). De hecho, se ha demostrado que cuando el capital natural entra explícitamente en la función de producción, la solución óptima de asignación de tierras compila con la definición de sinergia (Lopez, 2016, 2019); sin embargo, esto supone la presencia y contribución de SE en el sector AFOLU y esta relación carece de soporte empírico. En otras palabras, no está completamente claro si el proceso ecológico que tiene lugar en los ecosistemas forestales tiene un impacto positivo en la productividad del uso de la tierra y el bienestar.

Para abordar la brecha de conocimiento mencionada, la relación entre capital natural y bienestar se analizó en el sector de uso del suelo. El objetivo principal fue identificar la presencia de SE, evaluar su contribución al bienestar y derivar implicaciones políticas mediante la estimación de una función de producción (bajo la hipótesis nula de que los coeficientes relevantes son cero), análisis de sus propiedades y el cálculo de la asignación óptima de la tierra. El estado del capital natural se aproximó a través de datos de asignación de tierras y el modelo de transición forestal. Asimismo, el bienestar se abordó a través del PIB (Producto Interno Bruto) de uso de la tierra. Cien países –no incluidos en el anexo I de la UNFCCC (United Nations Framework Convention for Climate Change)– se incluyeron en este análisis.

## Materiales y métodos

### Fuentes de datos y preprocesamiento

La lista de países considerados en este estudio (Apéndice 1), la ubicación continental y su clasificación dentro del proceso de transición forestal se obtuvo de Hosonuma et al. (2012). La transición forestal es el proceso de deforestación y posterior reforestación que un país experimenta debido al desarrollo económico (Barbier, Burgess, & Grainger, 2010; Hosonuma et al., 2012). En el trabajo de investigación mencionado, los autores clasificaron 100 países tropicales y subtropicales (no incluidos en el anexo I de la UNFCCC) en una de las cuatro fases del proceso de transición forestal (pretransición, transición temprana, transición tardía y postransición), con base en la dinámica de uso del suelo observada en el periodo 1990-2010. La fase de pretransición se caracteriza por una alta cubierta forestal y una tasa baja de deforestación (v. g. cercana

rest of explanatory variables (agricultural land and forest area) were obtained from World Bank Open Data platform (The World Bank, 2019). The period considered for the latter mentioned variables was 1990-2016, due to availability of forest area data. A summary of the information presented so far along with additional characteristics of the variables is displayed in Table 1.

It is important to highlight that GDP is considered a limited and imperfect welfare indicator (Giannetti, Agostinho, Almeida, & Huisingsh, 2015; Kubiszewski et al., 2013). However, the purpose of the present analysis justifies the choice of the mentioned indicator: from an economic point of view, land use GDP clearly reflects the productivity of the sector and how it is affected by land use change. It must be considered, nonetheless, that some other important welfare dimensions –beyond the purpose of this research–, may not be fully reflected or excluded from the analysis due to this choice.

Data preprocessing consisted in transforming the raw data into its tidy version (Wickham, 2014). In other words, each observational unit (country-year pairs in this case) is in a row and each variable is in a column of the data frame. The transformation mentioned was implemented in R 3.6.1 (R Core Team, 2019), using the package dplyr (Wickham, François, Henry, & Müller, 2019). Concretely, the data related to forest transition classification was converted into a CSV file to be imported to the software R, where the country

a cero). Durante la transición temprana, la tasa de deforestación aumenta y, como consecuencia, la cobertura forestal disminuye. En la transición tardía, la tasa de deforestación se desacelera y la cubierta forestal es baja. Finalmente, la postransición se caracteriza por un proceso de reforestación (Hosonuma et al., 2012).

El indicador de bienestar (valor agregado de agricultura, silvicultura y pesca) –en adelante denominado PIB de uso del suelo– y el resto de variables explicativas (tierras agrícolas y área forestal) se obtuvieron de la plataforma *Open Data* del Banco Mundial (The World Bank, 2019). El periodo considerado para las variables antes mencionadas fue 1990-2016, debido a la disponibilidad de datos sobre áreas forestales. El Cuadro 1 muestra un resumen de la información presentada hasta el momento junto con las características adicionales de las variables.

Es importante destacar que el PIB se considera un indicador de bienestar limitado e imperfecto (Giannetti, Agostinho, Almeida, & Huisingsh, 2015; Kubiszewski et al., 2013). No obstante, el propósito del presente análisis justifica la elección del indicador mencionado: desde un punto de vista económico, el PIB del uso de la tierra refleja claramente la productividad del sector y cómo se ve afectado por el cambio en el uso de la tierra. A pesar de ello, se debe tener en cuenta que algunas otras dimensiones importantes del bienestar –más allá del propósito de esta investigación– pueden no ser

**Table 1. Variables used in the regression model, characteristics and information source.**

**Cuadro 1. Variables utilizadas en el modelo de regresión, características y fuente de información.**

Variable	Variable type / Tipo de variable	Units/categories / Unidades/categorías	Period / Periodo	Source / Fuente
Country / País	Not applicable / No aplicable	Not applicable / No aplicable	Not applicable / No aplicable	Hosonuma et al. (2012)
Continent (C) / Continente (C)	Categorical / Categórica	Africa*, America, Asia / África*, América, Asia	Not applicable / No aplicable	Hosonuma et al. (2012)
FT-Phase (S**) / Fase-TF (S**)	Ordinal	Pre*, Early, Late, Post / Pre*, temprana, tardía, post	Not applicable / No aplicable	Hosonuma et al. (2012)
Agriculture, forestry, and fishing value added (GDP) / Valor agregado (PIB) de la agricultura, silvicultura y pesca	Quantitative (continuous) / Cuantitativa (continua)	Constant 2010 (USD) / Constante 2010 (USD)	1990-2016	The World Bank (2019)
Agricultural land (A) / Terrenos agrícolas (A)	Quantitative (continuous) / Cuantitativa (continua)	Square kilometers / Kilómetros cuadrados	1990-2016	The World Bank (2019)
Forest cover (F) / Cubierta forestal (F)	Quantitative (continuous) / Cuantitativa (continua)	Square kilometers / Kilómetros cuadrados	1990-2016	The World Bank (2019)

FT: Forest transition; GDP: Gross Domestic Product. \*Reference level in regression model. \*\*S is used instead of phase to avoid confusion with P-values (P\*\*).

TF: transición forestal; PIB: producto interno bruto. \*Nivel de referencia en el modelo de regresión. \*\*S se usa en lugar de la fase (Phase) para evitar confusiones con los valores P (P\*\*).



code was added. This last step was required in order to identify countries unambiguously.

Variables obtained from The World Bank (2019) were joined to forest transition data and pivoted to satisfy the tidy format principles. This manipulation resulted in a data frame with 2 700 observations (100 countries and 17 years) and six variables (see Table 1 notice that country code was added but not used for further analysis). Incomplete observations were dropped, which reduced the number of observations to 2 376 (12 % data loss). An important consequence of the previous was that three countries –Eritrea, Salomon Islands and Somalia– were not included in the analysis due to lack of data. Hence, results were reported on the remaining 97 countries. This lastly mentioned data frame was used to perform an exploratory data analysis and fit a linear model.

### Exploratory Data Analysis and Statistical Model Specification

Exploratory data analysis allowed to identify the relationship between land use GDP and land use, which in turn supported the specification of the statistical model. In particular, the relationship between GDP and land allocation -taking into consideration the phase of the forest transition process and continental location- was explored. As Table 2 reveals, there is -in general- a strong positive correlation between the response (GDP) and the explanatory variables (Agricultural land and forest cover), when their relationship is linearized through natural logarithm.

The previously described relationship is maintained in qualitative terms and, in most cases, enhanced when the variables continent and FT-phase were controlled. In other words, the positive sign of Pearson correlation coefficient is preserved in all cases and its magnitude increased with respect to the general coefficient in most instances. For example, in the case of the relation between agricultural land and GDP (Figure 1), the magnitude of the correlation increased with respect to the general correlation coefficient in seven out of

plenamente reflejadas o excluidas del análisis debido a esta elección.

El preprocesamiento de la información consistió en la transformación de los datos en bruto en su versión ordenada (Wickham, 2014). En otras palabras, cada unidad de observación (pares país-año en este caso) está en una fila y cada variable está en una columna del marco de datos. La transformación mencionada fue implementada en R 3.6.1 (R Core Team, 2019), utilizando el paquete dplyr (Wickham, François, Henry, & Müller, 2019). Concretamente, los datos relacionados con la clasificación de transición forestal fueron convertidos en un archivo CSV para ser importados al *software* R, donde se agregó el código de país, para su identificación sin ambigüedades.

Las variables obtenidas del Banco Mundial (The World Bank, 2019) se unieron a los datos de transición forestal y se ajustaron para satisfacer los principios de formato ordenado. Esta manipulación dio como resultado un marco de datos con 2 700 observaciones (100 países y 17 años) y seis variables (Cuadro 1, haciendo notar que se agregó el código de país, pero no se utilizó para un análisis posterior). Las observaciones incompletas se eliminaron, lo que redujo el número de observaciones a 2 376 (12 % de pérdida de datos). Una consecuencia importante de este filtro fue que tres países –Eritrea, Islas Salomón y Somalia– no se incluyeron en el análisis debido a la falta de datos; por consiguiente, se reportaron los resultados de los 97 países restantes. Esta última matriz de datos se utilizó para hacer un análisis exploratorio de datos y ajustar un modelo lineal.

### Análisis exploratorio de datos y especificación del modelo estadístico

El análisis exploratorio de datos permitió identificar la relación entre el PIB de uso de la tierra y el uso de la tierra, lo que a su vez apoyó la especificación del modelo estadístico. En particular, se estudió la relación entre el PIB y la asignación de tierras, teniendo en cuenta la fase del proceso de transición forestal y la ubicación continental. Como revela el Cuadro 2, en

**Table 2. Pearson correlation coefficients between pairs of quantitative variables.**

**Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre pares de variables cuantitativas.**

Variable	Ln(GDP)/Ln(PIB)	Ln(Agricultural land)/ Ln(tierra agrícola)	Ln(Forest cover)/ Ln(cubierta forestal)
Ln(GDP)/Ln(PIB)	1	0.83	0.75
Ln(Agricultural land)/ Ln(tierra agrícola)		1	0.82
Ln(Forest cover)/ Ln(cubierta forestal)			1

GDP = Agriculture, forestry and fishing value added. Source: Author-made, based on The World Bank (2019).

PIB = Valor agregado de agricultura, silvicultura y pesca. Fuente: Elaboración propia basada en The World Bank (2019).

12 instances. Similarly, in the case of the relationship between forest land and GDP (Figure 2), only in one instance (Africa and Early phase combination) the correlation decreased with respect to the general

general, existe una fuerte correlación positiva entre la respuesta (PIB) y las variables explicativas (tierra agrícola y cubierta forestal), cuando su relación se linealiza a través del logaritmo natural.

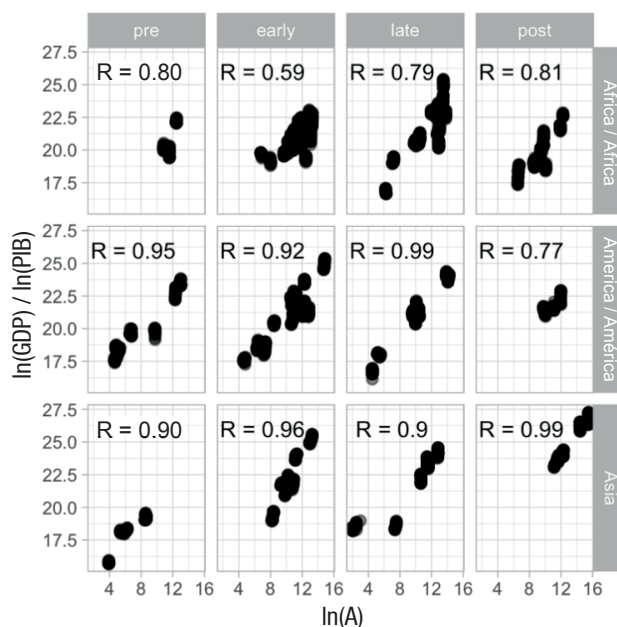


Figure 1. Correlation between agricultural land (A) and land use agriculture, forestry and fishing value added (GDP), controlling for continent and forest transition phase (pre-transition, early, late, and post-transition).

Figura 1. Correlación entre la superficie agrícola (A) y el valor agregado del uso de la tierra, la agricultura, la silvicultura y la pesca (PIB), controlado para continente y fase de transición forestal (pretransición, temprana [early], tardía [late] y postransición).

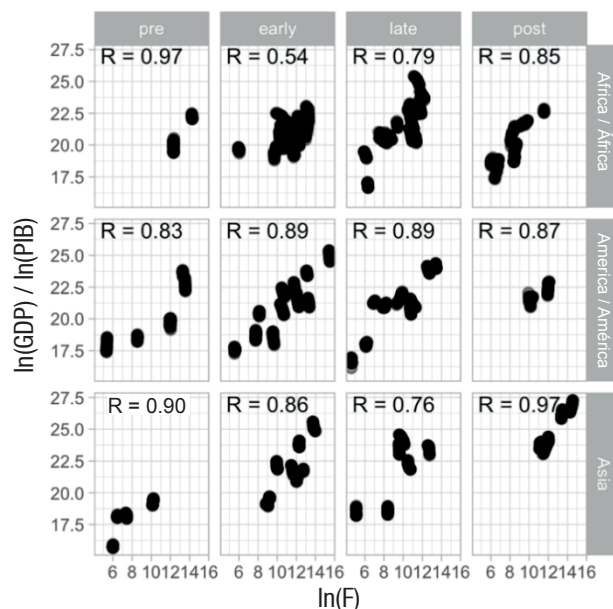


Figure 2. Correlation between forest cover (F) and land use agriculture, forestry and fishing value added (GDP), controlling for continent and forest transition phase (pre-transition, early, late, and post-transition).

Figura 2. Correlación entre la cobertura forestal (F) y el valor agregado del uso de suelo de la agricultura, silvicultura y pesca (PIB), controlando continente y fase de transición forestal (pretransición, temprana [early], tardía [late] y postransición).

correlation coefficient. In short, the exploratory data analysis showed that a linear relationship holds between the natural logarithm of GDP and explanatory variables (A, F). Moreover, the mentioned relationship improves when categorical variables (S, C) are controlled.

Based on the previous findings, six different models were tested (Table 3). The selection of the best model was done based on three different measures of goodness of fit, one absolute ( $R_{adj}^2$ ) and two relatives (Akaike Information Criteria [AIC] and Bayesian Information Criteria [BIC]). The  $R_{adj}^2$  considers the amount of variance explained by the model and penalizes the number of parameters used to fit it (R Core Team, 2019). Therefore, a higher  $R_{adj}^2$  indicates a better fit. On the other hand, relative measures compare models fitted to the same data, as it was done in this case. A lower number indicates a better fit (R Core Team, 2019). Table 3 shows that according to the three implemented criteria, model VI had the best fit to the data ( is the highest and AIC and BIC are the lowest). The models showed in this table were fitted using the original data set with the OLS (Ordinary Least Squared) method, using R 3.6.1 (R Core Team, 2019).

### Linear Regression Model and Bootstrap Method

Land use GDP is best explained by the following equation:

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \ln(A_i) + \hat{\beta}_2 \ln(F_i) + \hat{\beta}_3 C_i + \hat{\beta}_4 S_i + e_i$$

where,

$\hat{Y}_i$  = estimated natural logarithm of GDP

$\hat{\beta}_i$  = estimated coefficients of the model

$e_i$  = residuals.

La relación descrita anteriormente se mantiene en términos cualitativos y, en la gran mayoría de los casos, mejora cuando se controlan las variables continente y Fase-TF. En otras palabras, el signo positivo del coeficiente de correlación de Pearson se conservó en todos los casos y su magnitud aumentó con respecto al coeficiente general en la mayoría; por ejemplo, en el caso de la relación entre la tierra agrícola y el PIB (Figura 1), la magnitud de la correlación aumentó con respecto al coeficiente de correlación general en siete de los 12 casos. Del mismo modo, en el caso de la relación entre la tierra forestal y el PIB (Figura 2), solo en un caso (combinación de África y fase temprana) la correlación disminuyó con respecto al coeficiente de correlación general. En resumen, el análisis de datos exploratorios mostró que existe una relación lineal entre el logaritmo natural del PIB y las variables explicativas (A, F); además, la relación mencionada mejora cuando se controlan las variables categóricas (S, C).

Con base en los hallado previamente, se probaron seis modelos de regresión (Cuadro 3). El mejor modelo se seleccionó de acuerdo con tres medidas de bondad de ajuste; una absoluta ( $R_{adj}^2$ ) y dos relativas (Criterios de Información Akaike [AIC] y Criterios de Información Bayesianos [BIC]). El  $R_{adj}^2$  considera la cantidad de varianza explicada por el modelo y penaliza el número de parámetros utilizados (R Core Team, 2019); por tanto, un  $R_{adj}^2$  más alto indica mejor ajuste. Por otro lado, las medidas relativas comparan modelos ajustados a los mismos datos, como se hizo en este caso. Un número más bajo indica un mejor ajuste (R Core Team, 2019). El Cuadro 3 muestra que, según los tres criterios implementados, el modelo VI fue el que mejor se ajustó a los datos ( es el más alto y el AIC y el BIC son los más bajos). Los modelos mostrados en este cuadro se ajustaron utilizando el conjunto de datos original con

**Table 3. Goodness of fit of different regression models.**

**Cuadro 3. Bondad de ajuste de los modelos de regresión.**

Model/Modelo	Model specification/Especificación del modelo	$R_{adj}^2$	AIC	BIC
I	$\ln(Y) \sim \ln(F)$	0.55	8355	8372
II	$\ln(Y) \sim \ln(A)$	0.69	7453	7470
III	$\ln(Y) \sim \ln(F) + \ln(A)$	0.70	7361	7384
IV	$\ln(Y) \sim \ln(F) + \ln(A) + S$	0.74	7005	7046
V	$\ln(Y) \sim \ln(F) + \ln(A) + C$	0.80	6351	6386
VI	$\ln(Y) \sim \ln(F) + \ln(A) + S + C$	0.82	6106	6158

F: forest cover, A: agricultural land. S represents the variable forest transition phase, the reference level is the pre-transition phase; C represents the variable continent, the reference level is Africa. The symbol  $\sim$  indicates that the left-hand side variables is a function of the right-hand side variable(s).  $R_{adj}^2$  = adjusted coefficient of determination, AIC: Akaike Information Criteria, BIC: Bayesian Information Criteria.

F: cubierta forestal, A: terreno agrícola. S representa la variable fase de transición forestal, el nivel de referencia es la fase pretransición; C representa la variable continente, el nivel de referencia es África. El símbolo  $\sim$  indica que las variables del lado izquierdo son una función de las variables del lado derecho.  $R_{adj}^2$  = coeficiente de determinación ajustado, AIC: Criterio de Información Akaike, BIC: Criterio de Información Bayesiano.

From an economic point of view, this equation is a particular version of a Cobb-Douglas production function. This function has the advantage that its parameters have clear interpretations. For instance, the coefficients  $\beta_1$  and  $\beta_2$  are the partial elasticities of agricultural land and forest cover, respectively (Gujarati, 2003). This means that 1 % shift in specific land use (e.g., agricultural land), causes a shift in GDP accordingly with the estimated value of the corresponding coefficient. It is important to emphasize that according to the definition of ES adopted for this analysis, a positive and significant coefficient for the partial elasticity of a specific land use indicate the presence of ES and a direct contribution from the corresponding land use.

Similarly, production scale –the GDP obtained when 1 km<sup>2</sup> of land is allocated to each land use (Gujarati, 2003)– is defined in terms of the intercept ( $\beta_0$ ) and the coefficients  $\beta_3$  and  $\beta_4$ , which correspond to the different levels of the categorical variables. Therefore, for the reference level (Continent: Africa; FT-phase: Early; Table 1) the production scale is defined only by  $\beta_0$ . However, for changes in the continent and FT-phase variables, the production scale changes by the corresponding estimated value of the parameters  $\beta_3$  and  $\beta_4$ , which is zero for the reference category and a different value for any other category. This means that for every combination of the continent and FT-phase variables (12 in total), a production scale was estimated. It is important to highlight that a positive and significant production scale indicate an indirect (through land allocation) contribution of forest cover to welfare. The way in which deforestation affect this indirect effect is captured through the variable FT-phase.

The coefficients of the model were estimated using the bootstrap method (Efron, 1979; Efron & Hastie, 2016), which consists in resampling the original dataset with replacement and calculate the statistics of interest. In the current case these are the coefficients of equation. To perform the analysis, 10 thousand (replicable) bootstrap samples were simulated. In each simulation, the linear model was fitted using the OLS method and the resulting coefficients were stored for later analysis. Notice that the output of the described process is a vector of 10 thousand estimates for each coefficient in equation.

Linear regression with bootstrap yields similar results to classical linear regression (Sillabutra et al., 2016) and, additionally, allows to test a broader set of hypothesis related to the properties of the production function. For this study, testing statistical differences (through ANOVA) of production scale in terms of FT-phase (controlling for continent) is of particular interest to analyze the effect of land use change on production

el método OLS (Ordinary Least Squared), utilizando R 3.6.1 (R Core Team, 2019).

### Modelo de regresión lineal y método *bootstrap*

El PIB de uso de la tierra se explica mejor por la siguiente ecuación:

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \ln(A_i) + \hat{\beta}_2 \ln(F_i) + \hat{\beta}_3 C_i + \hat{\beta}_4 S_i + e_i$$

donde,

$\hat{Y}_i$  = logaritmo natural estimado del PIB

$\hat{\beta}_i$  = coeficientes estimados del modelo

$e_i$  = residuales.

Desde un punto de vista económico, esta ecuación es una versión particular de una función de producción Cobb-Douglas. La ventaja de esta función es que sus parámetros tienen interpretaciones claras; por ejemplo, los coeficientes  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son las elasticidades parciales de la tierra agrícola y la cubierta forestal, respectivamente (Gujarati, 2003). Esto significa que un cambio del 1 % en el uso específico de la tierra (v. g. las tierras agrícolas) provoca un cambio en el PIB de acuerdo con el valor estimado del coeficiente correspondiente. Es importante destacar que, de acuerdo con la definición de SE adoptada para este análisis, un coeficiente positivo y significativo para la elasticidad parcial de un uso específico del suelo indica la presencia de SE y una contribución directa del uso correspondiente del suelo.

Del mismo modo, la escala de producción –el PIB obtenido cuando se asigna 1 km<sup>2</sup> de tierra a cada uso del suelo (Gujarati, 2003)– se define en términos de la intersección ( $\beta_0$ ) y los coeficientes  $\beta_3$  y  $\beta_4$ , que corresponden a los niveles de las variables categóricas. Por tanto, para el nivel de referencia (continente: África; Fase-TF: temprana; Cuadro 1), la escala de producción se define solo por  $\beta_0$ ; sin embargo, para los cambios en las variables continente y Fase-TF, la escala de producción cambia por el valor estimado correspondiente de los parámetros  $\beta_3$  y  $\beta_4$ , que es cero para la categoría de referencia y un valor diferente para cualquier otra categoría. Esto significa que para cada combinación de las variables continente y Fase-TF (12 en total), se estimó una escala de producción. Es importante destacar que una escala de producción positiva y significativa indica una contribución indirecta (a través de la asignación de tierras) de la cobertura forestal al bienestar. La forma en que la deforestación influye en este efecto indirecto se captura a través de la variable Fase-TF.

Los coeficientes del modelo se estimaron utilizando el método *bootstrap* (Efron, 1979; Efron & Hastie, 2016), que consiste en el remuestreo del conjunto original de datos con reemplazo y el cálculo de las estadísticas



scale. A significant difference implies that production scale varies among the phases of forest transition process, which is relevant to assess how preservation of natural capital indirectly affects the selected indicator of welfare.

### Optimal land allocation

Optimal land allocation was calculated based on the point estimates of the production function and the amount of land allocated to agriculture and forests. In other words, the agricultural GDP was maximized using the parameterized version of equation subject to a land endowment, defined as the sum of agricultural land and forest cover. The restriction was calculated using the most recent observations of the countries analyzed, which in most cases corresponded to year 2016. The difference between observed allocation and optimal land allocation was then computed: a positive gap (forest surplus) indicates that a country has more land allocated to forest than optimal. Contrary, a negative gap (forest deficit) indicates that a country has less land allocated to forest than optimal. The described process was useful to define a country profile (e.g., forest surplus or deficit) and identify policy approach relevant for each situation.

## Results

### Partial Elasticities: Direct Effects of Land Use Change on GDP

As mentioned before, the coefficients  $\beta_1$  and  $\beta_2$  represent the partial elasticities of agricultural land (pea) and the partial elasticity forest cover (pef), respectively. Considering the point estimates and confidence intervals (CI) (Figure 3), it can be observed that both coefficients are significant with 95 % confidence (e.g., confidence interval does not contain zero). Moreover, the results also indicate that the partial elasticity of agriculture is significantly higher than partial elasticity of forest ( $P < 0.05$ ).

### Production Scale: Indirect Effects of Land Use Change on GDP

The coefficients determining production scale and their statistical properties are shown in Table 4. As it can be observed, the coefficients mentioned are significant with 95 % confidence (e.g., CI does not contain zero). However, it must be remembered that production scale is jointly determined by the coefficients  $\beta_0$ ,  $\beta_3$ , and  $\beta_4$ . Such effects combined are displayed in Figure 4, as it can be seen in the figure, there are two obvious patterns. First, production scales changes by continental location; the figure reveals that, in general, the lowest production scales were recorded in Africa,

de interés. En el caso actual, estos son los coeficientes de la ecuación. Para realizar el análisis, se simularon 10000 muestras de *bootstrap* (replicables). En cada simulación, el modelo lineal se ajustó con el método OLS y los coeficientes resultantes se almacenaron para su análisis posterior. El resultado del proceso descrito es un vector de 10 000 estimaciones para cada coeficiente en la ecuación.

La regresión lineal con *bootstrap* produce resultados similares a la regresión lineal clásica (Sillabutra et al., 2016) y, adicionalmente, permite probar un conjunto más amplio de hipótesis relacionadas con las propiedades de la función de producción. Para los efectos de este estudio, probar las diferencias estadísticas (a través de ANOVA) de la escala de producción en términos de la Fase-TF (controlada por continente) fue de particular interés para el análisis del efecto del cambio de uso de la tierra en la escala de producción. Una diferencia significativa implica que la escala de producción varía entre las fases del proceso de transición forestal, lo cual es relevante para evaluar cómo la preservación del capital natural afecta indirectamente al indicador de bienestar seleccionado.

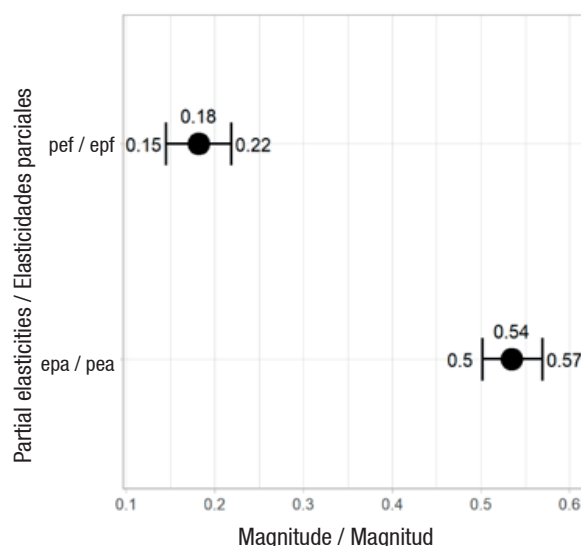
### Asignación óptima de tierras

La asignación óptima de la tierra se calculó sobre la base de las estimaciones puntuales de la función de producción y la cantidad de tierra asignada a la agricultura y los bosques. En otras palabras, el PIB agrícola se maximizó utilizando la versión parametrizada de la ecuación sujeta a una dotación de tierras, definida como la suma de la tierra agrícola y la cubierta forestal. La restricción se calculó utilizando las observaciones más recientes de los países analizados, que en la mayoría de los casos correspondieron al año 2016. Posteriormente se calculó la diferencia entre la asignación observada y la asignación óptima de tierras: una brecha positiva (superávit forestal) indica que un país tiene más tierra asignada al bosque que la óptima. Contrariamente, una brecha negativa (déficit forestal) indica que un país tiene menos tierra asignada al bosque que la óptima. El proceso descrito fue útil para definir un perfil de país (por ejemplo, superávit forestal o déficit) e identificar el enfoque de política relevante para cada situación.

## Resultados

### Elasticidades parciales: Efectos directos del cambio de uso de la tierra sobre el PIB

Como se mencionó anteriormente, los coeficientes  $\beta_1$  y  $\beta_2$  representan las elasticidades parciales de las tierras agrícolas (pea) y de la cubierta forestal (pef), respectivamente. Teniendo en cuenta las estimaciones



**Figure 3.** Point estimate and 95 % confidence intervals of partial elasticities of forest (pef) and agriculture (pea). The point estimate is the mean of the obtained vectors. The lower and upper bound of the confidence interval correspond to the 2.5 and 97.5 percentiles of the obtained vector for each coefficient.

**Figura 3.** Estimación puntual e intervalos de confianza del 95 % de las elasticidades parciales de los bosques (epf) y la agricultura (epa). La estimación puntual es la media de los vectores obtenidos. El límite inferior y superior del intervalo de confianza corresponde a los percentiles 2.5 y 97.5 del vector obtenido para cada coeficiente.

**Table 4.** Estimated coefficients for the selected linear model determining production scale and their statistical properties. **Cuadro 4.** Coeficientes estimados para el modelo lineal seleccionado que determina la escala de producción y sus propiedades estadísticas.

Variable	Coefficient / Coeficiente	Point estimate* / Estimación puntual*	95 % CI* / IC* del 95 %
Intercept (log of production scale for the reference level)	$\beta_0$	12.38	12.17- 2.60
Continent: America	$\beta_3$	0.88	0.80-0.95
Continent: Asia	$\beta_3$	1.62	1.53-1.72
FT-Phase: Early	$\beta_4$	0.47	0.35-0.59
FT-Phase: Late	$\beta_4$	0.97	0.82-1.13
FT-Phase: Post	$\beta_4$	1.12	0.98-1.25

FT: forest transition. \*The point estimate is the mean of the obtained vectors. The lower and upper bound of the confidence interval (CI) correspond to the 2.5 and 97.5 percentiles of the obtained vector for each coefficient.

TF: transición forestal. \*La estimación puntual es la media de los vectores obtenidos. El límite inferior y superior del intervalo de confianza (IC) corresponde a los percentiles 2.5 y 97.5 del vector obtenido para cada coeficiente.

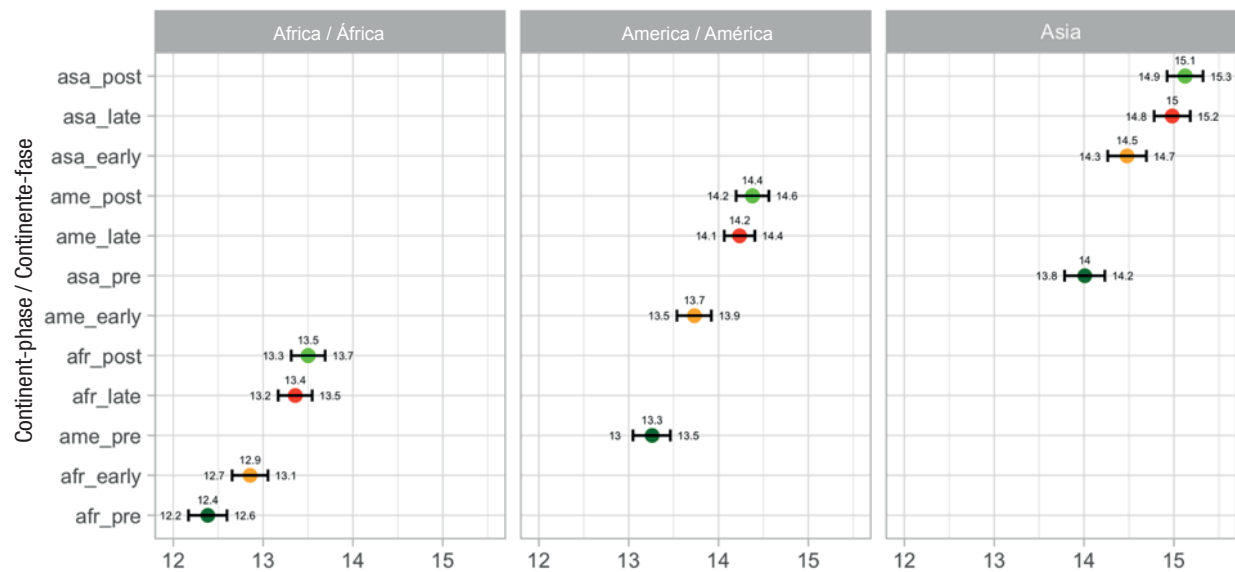
they increased in America and were the highest in Asia. The second pattern, which is more relevant in terms of policy, showed that production scale increased as countries moved through forest transition process. This means that the lowest production scales were observed in countries at pre-transition stage and increased in countries at early or late transition (with respect to the previous stage), reaching its maximum level in countries at the post transition phase.

It is also relevant to highlight that according to ANOVA analysis (complemented with pairwise Wilcoxon test), production scale parameters were statistically different

puntuales y los intervalos de confianza (IC) (Figura 3), se puede observar que ambos coeficientes son significativos con una confianza del 95 % (por ejemplo, el intervalo de confianza no contiene cero); además, los resultados también indican que la elasticidad parcial de la agricultura es significativamente mayor que la elasticidad parcial del bosque ( $P < 0.05$ ).

#### Escala de producción: efectos indirectos del cambio del uso de la tierra sobre el PIB

Los coeficientes que determinan la escala de producción y sus propiedades estadísticas se muestran en la Cuadro 4.



**Figure 4.** Point estimate and 95 % confidence interval of production scale per combination of continent (asa = Asia, ame = America, afr = Africa) and forest transition phase (pre-transition, early, late, and post-transition).

**Figura 4.** Estimación puntual e intervalo de confianza del 95 % de la escala de producción por combinación de continente (asa = Asia, ame = América, afr = África) y fase de transición forestal (pretransición, temprana [early], tardía [late] y postransición).

from each other in terms of FT-phase when continent (variable C) was controlled ( $P < 0.05$ , Figure 5). Therefore, the degree of conservation of natural capital plays a role in determining the productivity of land use sector. However, as the analysis reveals, production scale tends to increase when natural capital is depleted. For instance, the model predicts that -regardless of the continent-, countries initiating a deforestation process (e.g., moving from a pre-transition to an early transition) will increase their production scale. An analogous reasoning applies for other phases of forest transition process.

### Optimal Land Allocation

Optimal land allocation for each country analyzed is shown in Figure 6. As it can be seen in the figure, most countries in the situation of a forest deficit are at late transition phase; for example, Argentina, South Africa, and Nigeria. On the contrary, countries with important forest surplus are at pre-transition or early transition stage. In fact, all countries classified in the pre-transition phase (13) and vast majority of countries at early-transition phase (36/39) have a forest surplus. It is evident that most countries (75) are characterized by a forest surplus, (aggregated surface is 13.2 Mkm<sup>2</sup>), while only a minority of countries (22) are in a situation of deficit (aggregated surface is 1.5 Mkm<sup>2</sup>); hence, according to the analysis, the tropical world still has a forest surplus of 11.7 Mkm<sup>2</sup>.

Como puede observarse, los coeficientes mencionados son significativos con una confianza del 95 % (por ejemplo, el IC no contiene cero). No obstante, se debe recordar que la escala de producción está determinada conjuntamente por los coeficientes  $\beta_0$ ,  $\beta_3$ , y  $\beta_4$ . Tales efectos combinados se muestran en la Figura 4, donde se pueden apreciar dos patrones. En primer lugar, las escalas de producción cambian según la ubicación continental; la cifra revela que, en general, las escalas de producción más bajas se registraron en África, aumentaron en América y fueron más altas en Asia. El segundo patrón, que es más relevante en términos de política, mostró que la escala de producción aumentó a medida que los países avanzaron a través del proceso de transición forestal. Esto significa que las escalas de producción más bajas se observaron en los países en la fase previa a la transición y aumentaron en los países en la transición temprana o tardía (con respecto a la fase anterior), alcanzando su nivel máximo en los países en la fase posterior a la transición.

También es relevante destacar que según el análisis ANOVA (complementado con la prueba de Wilcoxon por pares), los parámetros de la escala de producción fueron estadísticamente diferentes entre sí en términos de Fase-TF cuando se controló el continente (variable C) ( $P < 0.05$ , Figura 5). Por tanto, el grado de conservación del capital natural juega un papel en la determinación de la productividad del sector de uso de la tierra; sin embargo, como revela el análisis, la escala

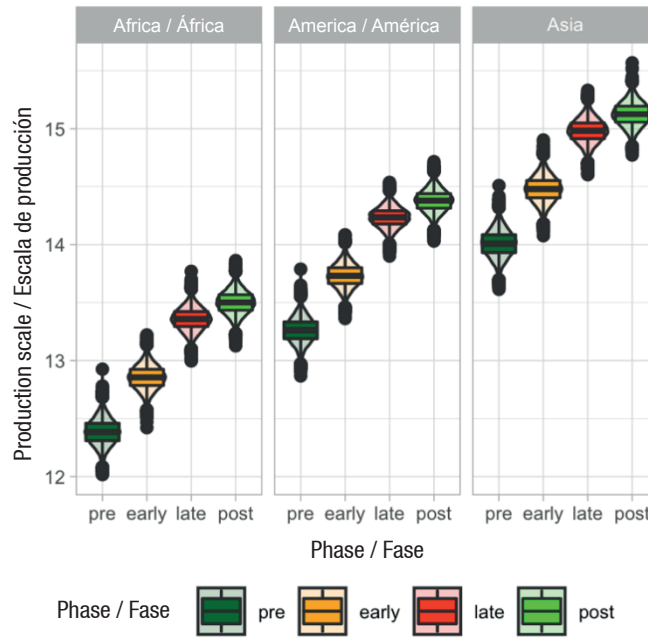


Figure 5. Bootstrap estimations of production scale per continent and forest transition phase (pre-transition, early, late, and post-transition).

Figura 5. Estimaciones bootstrap de escala de producción por continente y fase de transición forestal (pretransición, temprana [early], tardía [late] y postransición).

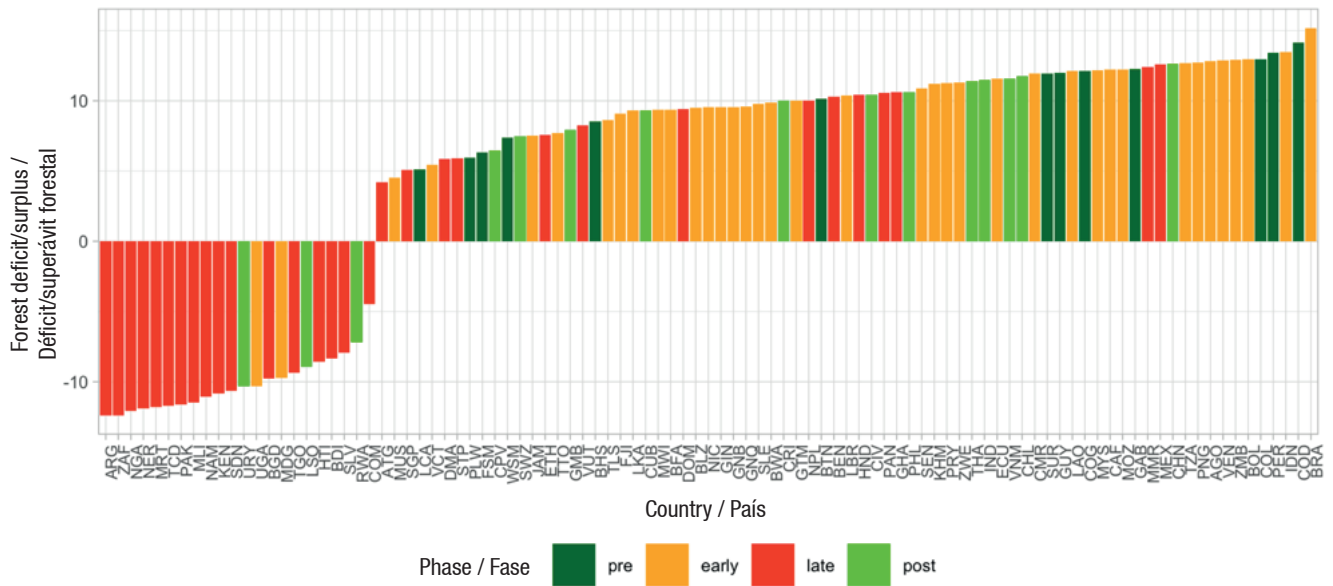


Figure 6. Forest surplus/deficit per country (Appendix 1). The height of the bar represents the calculated surface in log scale. Forest transition phase: pre-transition, early, late, and post-transition.

Figura 6. Superávit/déficit forestal por país (Apéndice 1). La altura de la barra representa la superficie calculada en escala logarítmica. Fase de transición forestal: pretransición, temprana (early), tardía (late) y postransición.



## Discussion

The results support that natural capital plays an important role in the productivity of land use system in the tropics. Specifically, the results indicate that there is a direct and an indirect contribution of forest ecosystems to GDP and, by extension, to at least one dimension of welfare, which is in line with the current conception of ES (Costanza et al., 2017; Daw et al., 2016). The direct effect is manifested through the partial elasticity of forestland (coefficient  $\hat{\beta}_2$ ). The second effect is reflected through the production scale (coefficient  $\hat{\beta}_0$  in combination with continental location). This implies that forest ecosystems are effectively generating ES for society. Due to the nature of the welfare indicator used in this analysis, it is likely that the first effect described is capturing the role of provisioning ES. It is hypothesized that the second effect is reflecting the role of regulating ES, however, further research will be needed to fully support this claim.

It is important to highlight that the contributions of forest ecosystems are dwarfed by agricultural land productivity. In fact, the properties of the production function indicate that important economic incentives to deforest exist in tropical countries. On one hand, the partial elasticity of forestland is significantly lower than the partial elasticity of agricultural land ( $\hat{\beta}_2 < \hat{\beta}_1$ , Figure 3), which means that forestland owners in the tropics face an opportunity cost by keeping forestland in its current use. On the other hand, the results showed that production scale is the lowest at pre-transition stage and increases as degradation of forest ecosystems take place (e.g., at early or late transition phases). This shows that depleting natural capital increases productivity of land use system when only economic indicators are considered. However, in the absence of regulation in the AFOLU sector, this is likely the main criteria considered when land use decisions are made.

It was particularly surprising to find that countries at post-transition phase, where reforestation process is taking place, have an even higher production scale. The fact that reforestation effects are captured by GDP raises important questions about the nature of the restoration process taking place in the countries classified at this stage. For example, whether reforestation is driven mainly by commercial forestry or environmental concerns is highly relevant for policy design. However, further research will be needed to address this question. For example, by analyzing the role of different forests types, which was omitted in this study.

The combined effect of the previously described incentives to deforest is reflected in the fact that most tropical countries still find profitable to expand agriculture frontier. Hence, the analysis suggests

de producción tiende a aumentar cuando el capital natural se agota. Por ejemplo, el modelo predice que, independientemente del continente, los países que inicien un proceso de deforestación (por ejemplo, pasando de una transición previa a una transición temprana) aumentarán su escala de producción. Un razonamiento análogo se aplica para otras fases del proceso de transición forestal.

## Asignación óptima de tierras

La asignación óptima de tierras para cada país analizado se muestra en la Figura 6. Como puede observarse, la gran mayoría de los países en situación de déficit forestal se encuentra en fase de transición tardía; por ejemplo, Argentina, Sudáfrica y Nigeria. Por el contrario, los países con importante superávit forestal se encuentran en etapa de transición previa o temprana. De hecho, todos los países clasificados en la fase previa a la transición (13) y la gran mayoría de los países en la fase de transición temprana (36/39) tienen superávit forestal. Es evidente que la mayoría de los países (75) se caracterizan por un superávit forestal (la superficie agregada es de 13.2 Mkm<sup>2</sup>), mientras que solo una minoría (22) se encuentra en situación de déficit (la superficie agregada es de 1.5 Mkm<sup>2</sup>); por lo tanto, según el análisis, el mundo tropical todavía tiene superávit forestal de 11.7 Mkm<sup>2</sup>.

## Discusión

Los resultados sustentan que el capital natural juega un papel importante en la productividad del sistema de uso de la tierra en los trópicos. Específicamente, los resultados indican que existe contribución directa e indirecta de los ecosistemas forestales al PIB y, por extensión, a por lo menos una dimensión del bienestar, lo que se alinea con la concepción actual de SE (Costanza et al., 2017; Daw et al., 2016). El efecto directo se manifiesta a través de la elasticidad parcial de las tierras forestales (coeficiente  $\hat{\beta}_2$ ). El segundo efecto se refleja a través de la escala de producción (coeficiente  $\hat{\beta}_0$  en combinación con la ubicación continental). Esto implica que los ecosistemas forestales están generando, efectivamente, SE para la sociedad. Debido a la naturaleza del indicador de bienestar utilizado en este análisis, es probable que el primer efecto descrito capture los SE de aprovisionamiento. Se plantea la hipótesis de que el segundo efecto refleja el papel de la regulación de los SE; sin embargo, se necesitarán más investigaciones para respaldar plenamente esta afirmación.

Es importante destacar que las contribuciones de los ecosistemas forestales se ven opacadas por la productividad de la tierra agrícola. De hecho, las propiedades de la función de producción indican que existen incentivos económicos importantes para la deforestación en los países tropicales. Por un lado, la elasticidad parcial de las tierras forestales es

that under current conditions, deforestation in the tropics is not likely to stop. Nevertheless, the results of this study are useful to detect relevant policy approaches at nation level. For instance, countries with forest deficit may incentivize reforestation based on emission reduction projects, such as the Clean Development Mechanism. Likewise, countries with forest surplus may incentivize preservation based on avoided emissions mechanisms, such as REDD+ (Reduction of Emissions from Deforestation and Forest Degradation).

The previous findings add evidence to the broad consensus about agriculture expansion being the main source of deforestation in the tropics (Hosonuma et al., 2012; Kaimowitz & Angelsen, 1998; Sy et al., 2019) and opportunity cost one of the main economic incentives (Barbier et al., 2010). In addition, the findings show that links between deforestation and different types of ES in the tropics are complex and in some cases indirect, as suggested in previous research (Daw et al., 2016). The findings, nonetheless, expand previous research by posing and quantifying a plausible causal explanation of tropical deforestation. The corroboration of previous findings in the context of tropical deforestation and the addition presented in this study can be useful to design policy interventions able to address social and environmental goals.

Finally, it is important to stress that economic indicators are a useful but limited information source to address the complex challenges that sustainable development pose. Therefore, further research is needed to incorporate environmental concerns into a robust policy design in the AFOLU sector.

## Conclusions

Considering the land use agriculture, forestry and fishing value added (GDP) as an imperfect welfare indicator, it was found that forest ecosystems in the Agriculture, Forestry and Other Land Use sector in the tropics produce ecosystem services for society. This is, their presence effectively adds to GDP. However, these contributions are dwarfed by agricultural land productivity. In fact, the identified properties of the production function revealed that in most tropical countries important economic incentives to expand the agriculture frontier are still present. Therefore, under current circumstances, deforestation is not likely to be stop or reverted in the future. However, based on current forest preservation profile of the countries analyzed, policy approaches relevant at nation level were identified; in other words, whether the implementation of environmental policy should emphasize reforestation or preservation.

significativamente menor que la elasticidad parcial de las tierras agrícolas ( $\hat{\beta}_2 < \hat{\beta}_1$ , Figura 3), lo que significa que los propietarios de las tierras forestales en los trópicos enfrentan un costo de oportunidad al mantener las tierras forestales en su uso actual. Por otro lado, los resultados mostraron que la escala de producción es más baja en la etapa previa a la transición y aumenta a medida que se produce la degradación de los ecosistemas forestales (por ejemplo, en las fases de transición temprana o tardía). Esto demuestra que el agotamiento del capital natural aumenta la productividad del sistema de uso de la tierra cuando solo se consideran indicadores económicos; sin embargo, a falta de regulación en el sector AFOLU, este es probablemente el criterio principal que se considera cuando se toma la decisión de uso de la tierra.

Fue particularmente sorprendente encontrar que los países en fase posterior de postransición, donde se está llevando a cabo el proceso de reforestación, tienen una escala de producción aún mayor. El hecho de que los efectos de la reforestación sean captados por el PIB plantea cuestiones importantes sobre la naturaleza del proceso de restauración que se está llevando a cabo en los países clasificados en esta etapa; por ejemplo, saber si la reforestación es impulsada principalmente por la silvicultura comercial o las preocupaciones medioambientales es muy relevante para el diseño de políticas, por lo que se necesitarán más investigaciones para abordar esta cuestión, tales como el análisis de la función de los tipos de bosques, que se omitió en este estudio.

En realidad, el efecto combinado de los incentivos para deforestar se refleja en el hecho de que la gran mayoría de los países tropicales todavía encuentra rentable la expansión de la frontera agrícola. Por lo tanto, el análisis sugiere que, en las condiciones actuales, no es probable que la deforestación en los trópicos se detenga. No obstante, los resultados de este estudio son útiles para detectar enfoques de política relevantes a nivel nacional; por ejemplo, los países con déficit forestal pueden incentivar la reforestación basada en proyectos de reducción de emisiones, como el Mecanismo de Desarrollo Limpio. Asimismo, los países con superávit forestal pueden incentivar la preservación basada en mecanismos de emisiones evitadas, como REDD+ (Reduction of Emissions from Deforestation and Forest Degradation).

Los resultados anteriores añaden evidencia al amplio consenso acerca de que la expansión agrícola es la principal fuente de deforestación en los trópicos (Hosonuma et al., 2012; Kaimowitz & Angelsen, 1998; Sy et al., 2019) y que el costo de oportunidad es uno de los principales incentivos económicos (Barbier et al., 2010);

## Acknowledgments

This paper is partially based on the research performed during the time the author was a student of the postgraduate degree in statistical methods of the University of Veracruz. Hence, the author is grateful to the mentioned institution and CONACyT for the financial support. The research also was greatly benefited from the academic exchange at UABC, specially, the feedback provided by Dra. Ileana Espejel. The author is also thankful to FUDLAP for additional financial support.

*End of English version*

## References / Referencias

- Barbier, E. B., Burgess, J. C., & Grainger, A. (2010). The forest transition: Towards a more comprehensive theoretical framework. *Land Use Policy*, 27(2), 98–107. doi: 10.1016/j.landusepol.2009.02.001
- Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., ... Grasso, M. (2017). Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 28(A), 1–16. doi: 10.1016/j.ecoser.2017.09.008
- Daw, T. M., Hicks, C. C., Brown, K., Chaigneau, T., Januchowski-Hartley, F. A., Cheung, W. W. L., ... McClanahan, T. R. (2016). Elasticity in ecosystem services: Exploring the variable relationship between ecosystems and human well-being. *Ecology and Society*, 21(2), 11. doi: 10.5751/ES-08173-210211
- Di Gregorio, M., Nurrochmat, D. R., Paavola, J., Sari, I. M., Fatorelli, L., Pramova, E., ... Kusumadewi, S. D. (2017). Climate policy integration in the land use sector: Mitigation, adaptation and sustainable development linkages. *Environmental Science & Policy*, 67, 35–43. doi: 10.1016/j.envsci.2016.11.004
- Duguma, L. A., Minang, P. A., & van Noordwijk, M. (2014). Climate change mitigation and adaptation in the land use sector: From complementarity to synergy. *Environmental Management*, 54(3), 420–432. doi: 10.1007/s00267-014-0331-x
- Efron, B. (1979). Bootstrap methods: another look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1), 1–26. doi: 10.1214/aos/1176344552
- Efron, B., & Hastie, T. (2016). *Computer age statistical inference: Algorithms, evidence, and data science*. USA: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781316576533
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). *Climate smart agriculture sourcebook* (2nd ed.). Italy: Author. Retrieved from <http://www.fao.org/climate-smart-agriculture-sourcebook/en/>
- Giannetti, B. F., Agostinho, F., Almeida, C. M. V. B., & Huisingh, D. (2015). A review of limitations of GDP and alternative indices to monitor human wellbeing and to manage ecosystem functionality. *Journal of Cleaner Production*, 87, 11–25. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.10.051
- además, muestran que los vínculos entre la deforestación y los tipos de SE en los trópicos son complejos y, en algunos casos, indirectos, como se ha sugerido en investigaciones anteriores (Daw et al., 2016). Asimismo, lo encontrado en este estudio amplía las investigaciones anteriores al plantear y cuantificar una explicación causal plausible de la deforestación tropical. La corroboración de los resultados en el contexto de la deforestación tropical y la adición presentada en este estudio pueden ser útiles para el diseño de intervenciones políticas capaces de abordar objetivos sociales y ambientales.
- Por último, es importante destacar que los indicadores económicos son una fuente de información útil, pero limitada, para hacer frente a los complejos desafíos que el desarrollo sostenible plantea. Por lo tanto, se necesita más investigación para incorporar las preocupaciones medioambientales en un diseño sólido de políticas en el sector AFOLU.

## Conclusiones

Con base en el valor agregado (PIB) de la agricultura, la silvicultura y la pesca, el cual se considera un indicador de bienestar imperfecto, se encontró que los ecosistemas forestales en el sector de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra en los trópicos producen servicios ecosistémicos para la sociedad; es decir, su presencia efectivamente suma al PIB. No obstante, estas contribuciones se ven opacadas por la productividad de la tierra agrícola. De hecho, las propiedades identificadas de la función de producción revelaron que en la mayoría de los países tropicales todavía existen incentivos económicos importantes para la expansión de la frontera agrícola. Por tanto, en las circunstancias actuales, no es probable que la deforestación se detenga o se revierta. De acuerdo con el perfil actual de preservación forestal de los países analizados, se identificaron enfoques de política relevantes a nivel nacional; en otras palabras, se determinó si la implementación de la política ambiental debe enfatizar la reforestación o la preservación.

## Agradecimientos

Este artículo está parcialmente basado en la investigación realizada durante el tiempo en que el autor fue estudiante del Posgrado en Métodos Estadísticos en la Universidad Veracruzana. Por tanto, el autor agradece a la institución antes mencionada y al CONACyT por el apoyo económico. La investigación también se benefició ampliamente con el intercambio académico con la UABC, especialmente con la retroalimentación de la Dra. Ileana Espejel. El autor también agradece al FUDLAP por su apoyo económico adicional.

*Fin de la versión en español*

- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., ... Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812–818. doi: 10.1126/science.1185383
- Gujarati, D. N. (2003). *Basic econometrics* (4th ed.). Portugal: Elsevier.
- Harvey, C. A., Chacón, M., Donatti, C. I., Garen, E., Hannah, L., Andrade, A., ... Wollenberg, E. (2014). Climate-Smart landscapes: Opportunities and challenges for integrating adaptation and mitigation in tropical agriculture. *Conservation Letters*, 7(2), 77–90. doi: 10.1111/conl.12066
- HLPE. (2017). *Sustainable forestry for food security and nutrition: A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition*. Italy: FAO. Retrieved from [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/hlpe/hlpe\\_documents/HLPE\\_Reports/HLPE-Report-11\\_EN.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/hlpe/hlpe_documents/HLPE_Reports/HLPE-Report-11_EN.pdf)
- Hosonuma, N., Herold, M., de Sy, V., de Fries, R. S., Brockhaus, M., Verchot, L., ... Romijn, E. (2012). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4), 1–12. doi: 10.1088/1748-9326/7/4/044009
- Kaimowitz, D., & Angelsen, A. (1998). *Economic models of tropical deforestation: A review*. Bogor, Indonesia: CIFOR.
- Kubiszewski, I., Costanza, R., Franco, C., Lawn, P., Talberth, J., Jackson, T., & Aylmer, C. (2013). Beyond GDP: Measuring and achieving global genuine progress. *Ecological Economics*, 93, 57–68. doi: 10.1016/j.ecolecon.2013.04.019
- Locatelli, B., Lavorel, S., Sloan, S., Tappeiner, U., & Geneletti, D. (2017). Characteristic trajectories of ecosystem services in mountains. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(3), 150–159. doi: 10.1002/fee.1470
- Lopez, M. (2016). When does the integration of mitigation and adaptation in the land use sector actually makes sense? *Ekonomia*, 46, 101–119. doi: 10.17451/eko/46/2016/247
- Lopez, M. (2019). Climate policy integration in a land use system with ecological thresholds. *Economic and Environmental Studies*, 19(1), 49. Retrieved from <https://czasopisma.uni.opole.pl/index.php/ees/article/view/301>
- Mbow, C., & Rosenzweig, C. (2019). Food security. In The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.), *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (pp. 1–200). Retrieved from <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being. Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment*. USA: Island Press. Retrieved from <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- R Core Team. (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.R-project.org/>
- Reed, J., van Vianen, J., Foli, S., Clendenning, J., Yang, K., MacDonald, M., ... Sunderland, T. (2017). Trees for life: The ecosystem service contribution of trees to food production and livelihoods in the tropics. *Forest Policy and Economics*, 84, 62–71. doi: 10.1016/j.forpol.2017.01.012
- Sharma, R., Rimal, B., Baral, H., Nehren, U., Paudyal, K., Sharma, S., ... Kandel, P. (2019). Impact of land cover change on ecosystem services in a tropical forested landscape. *Resources*, 8(1), 18. doi: 10.3390/resources8010018
- Sillabutra, J., Kitidamrongsuk, P., Viwatwongkasem, C., Ujeh, C., Sae-tang, S., & Donjdee, K. (2016). Bootstrapping with R to make generalized inference for regression model. *Procedia Computer Science*, 86, 228–231. doi: 10.1016/j.procs.2016.05.103
- Sy, V. D., Herold, M., Achard, F., Avitabile, V., Baccini, A., Carter, S., ... Verchot, L. (2019). Tropical deforestation drivers and associated carbon emission factors derived from remote sensing data. *Environmental Research Letters*, 14(9), 094022. doi: 10.1088/1748-9326/ab3dc6
- Wickham, H. (2014). Tidy data. *Journal of Statistical Software*, 59(1), 1–23. doi: 10.18637/jss.v059.i10
- Wickham, H., François, R., Henry, L., & Müller, K. (2019). dplyr: A grammar of data manipulation (Version R package version 0.8.3). Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- The World Bank. (2019). World Bank Open Data. Retrieved August 29, 2019, from <https://data.worldbank.org/>



## Appendix 1. List of countries considered in the analysis.

## Apéndice 1. Lista de países considerados en el análisis.

Country/ País	Code/Código	Continent/Continente	Phase/Fase	Status/Estatus
Angola	AGO	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Antigua and Barbuda/ Antigua y Barbuda	ATG	America/América	late/tardía	included/incluido
Argentina	ARG	America/América	late/tardía	included/incluido
Bahamas	BHS	America/América	pre/previa	included/incluido
Bangladesh	BGD	Asia	late/tardía	included/incluido
Belize/Belice	BLZ	America/América	early/temprana	included/incluido
Benin/Benín	BEN	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Bhutan/Bután	BTN	Asia	pre/previa	included/incluido
Bolivia	BOL	America/América	early/temprana	included/incluido
Botswana/Botsuana	BWA	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Brazil/Brasil	BRA	America/América	early/temprana	included/incluido
Burkina Faso	BFA	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Burundi	BDI	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Cambodia/Camboya	KHM	Asia	early/temprana	included/incluido
Cameroon/Camerún	CMR	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Cape Verde/Cabo Verde	CPV	Africa/África	post/posterior	included/incluido
Central African Republic/ República Centroafricana	CAF	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Chad	TCD	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Chile	CHL	America/América	post/posterior	included/incluido
China	CHN	Asia	post/posterior	included/incluido
Colombia	COL	America/América	pre/previa	included/incluido
Comoros/Comoras	COM	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Congo	COG	Africa/África	pre/previa	included/incluido
Costa Rica	CRI	America/América	post/posterior	included/incluido
Cote d'Ivoire/ Costa de Marfil	CIV	Africa/África	post/posterior	included/incluido
Cuba	CUB	America/América	post/posterior	included/incluido
Democratic Republic of the Congo/ República Democrática del Congo	COD	Africa/África	pre/previa	included/incluido
Dominica	DMA	America/América	late/tardía	included/incluido
Dominican Republic/ República Dominicana	DOM	America/América	late/tardía	included/incluido
Ecuador	ECU	America/América	early/temprana	included/incluido
El Salvador	SLV	America/América	late/tardía	included/incluido
Equatorial Guinea/ Guinea Ecuatorial	GNQ	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Eritrea	ERI	Africa/África	late/tardía	excluded
Ethiopia/Etiopía	ETH	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Fiji	FJI	Asia	early/temprana	included/incluido
Gabon/Gabón	GAB	Africa/África	pre/previa	included/incluido
Gambia	GMB	Africa/África	post/posterior	included/incluido

## Appendix 1. List of countries considered in the analysis. (cont.)

## Apéndice 1. Lista de países considerados en el análisis. (cont.)

Country/ País	Code/Código	Continent/Continente	Phase/Fase	Status/Estatus
Ghana	GHA	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Guatemala	GTM	America/América	early/temprana	included/incluido
Guinea	GIN	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Guinea-Bissau	GNB	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Guyana	GUY	America/América	pre/previa	included/incluido
Haiti/Haití	HTI	America/América	late/tardía	included/incluido
Honduras	HND	America/América	late/tardía	included/incluido
India	IND	Asia	post/posterior	included/incluido
Indonesia	IDN	Asia	early/temprana	included/incluido
Jamaica	JAM	America/América	early/temprana	included/incluido
Kenya/Kenia	KEN	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Lesotho/Lesoto	LSO	Africa/África	post/posterior	included/incluido
Lao People's Democratic Republic/ República Democrática Popular Lao	LAO	Asia	early/temprana	included/incluido
Liberia	LBR	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Madagascar	MDG	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Malawi/Malawi	MWI	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Malaysia/Malasia	MYS	Asia	early/temprana	included/incluido
Mali/Malí	MLI	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Mauritania	MRT	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Mauritius/Mauricio	MUS	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Mexico/México	MEX	America/América	late/tardía	included/incluido
Micronesia (Federated States of)/Micronesia (Estados Federados de)	FSM	Asia	pre/previa	included/incluido
Mozambique	MOZ	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Myanmar	MMR	Asia	late/tardía	included/incluido
Namibia	NAM	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Nepal	NPL	Asia	late/tardía	included/incluido
Nicaragua	NIC	America/América	early/temprana	included/incluido
Niger/Níger	NER	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Nigeria	NGA	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Pakistan/Pakistán	PAK	Asia	late/tardía	included/incluido
Palau	PLW	Asia	pre/previa	included/incluido
Panama/Panamá	PAN	America/América	late/tardía	included/incluido
Papua New Guinea/ Papúa Nueva Guinea	PNG	Asia	early/temprana	included/incluido
Paraguay	PRY	America/América	early/temprana	included/incluido
Peru/Perú	PER	America/América	pre/previa	included/incluido
Philippines/Filipinas	PHL	Asia	post/posterior	included/incluido
Rwanda/Ruanda	RWA	Africa/África	post/posterior	included/incluido
Saint Lucia/Santa Lucía	LCA	America/América	pre/previa	included/incluido

**Appendix 1. List of countries considered in the analysis. (cont.)****Apéndice 1. Lista de países considerados en el análisis. (cont.)**

Country/ País	Code/Código	Continent/Continente	Phase/Fase	Status/Estatus
Saint Vincent and the Grenadines/ San Vicente y las Granadinas	VCT	America/América	early/temprana	included/incluido
Samoa	WSM	Asia	pre/previa	included/incluido
Sao Tome and Principe/ Santo Tomé y Príncipe	STP	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Senegal	SEN	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Sierra Leone/Sierra Leona	SLE	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Singapore/Singapur	SGP	Asia	late/tardía	included/incluido
Solomon Islands/ Islas Salomón	SLB	Asia	early/temprana	excluded
Somalia	SOM	Africa/África	late/tardía	excluded
South Africa/Sudáfrica	ZAF	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Sri Lanka	LKA	Asia	early/temprana	included/incluido
Sudan/Sudán	SDN	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Surinam	SUR	America/América	pre/previa	included/incluido
Swaziland/Suazilandia	SWZ	Africa/África	post/posterior	included/incluido
Tanzania	TZA	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Thailand/Tailandia	THA	Asia	post/posterior	included/incluido
Timor-Leste/Timor Oriental	TLS	Asia	early/temprana	included/incluido
Togo	TGO	Africa/África	late/tardía	included/incluido
Trinidad and Tobago/ Trinidad y Tobago	TTO	America/América	early/temprana	included/incluido
Uganda	UGA	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Uruguay	URY	Africa/África	post/posterior	included/incluido
Vanuatu	VUT	Asia	late/tardía	included/incluido
Venezuela	VEN	America/América	early/temprana	included/incluido
Vietnam	VNM	Asia	post/posterior	included/incluido
Zambia	ZMB	Africa/África	early/temprana	included/incluido
Zimbabwe	ZWE	Africa/África	early/temprana	included/incluido

Source: Author-made, based on Hosonuma et al. (2012).

Fuente: Elaboración propia basada en Hosonuma et al. (2012).